

บทความรับเชิญ

กลศาสตร์ควอนตัม 0.4

สุทัศน์ ยกส้าน

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงความคิดรวบยอดและหลักการต่างๆ ที่จำเป็นเพื่อจะได้เข้าใจวิชากลศาสตร์ควอนตัมในระดับเบื้องต้น ที่เหมาะสำหรับคนทั่วไป โดยได้อธิบายเรื่องฟังก์ชันคลื่น ทวิภาพของคลื่นและอนุภาค ความหมายของแมชโรดิงเจอร์ โอกาสความเป็นไปได้ หลักความไม่แน่นอน การซ้อนทับ ความพัวพัน และอื่นๆ เพราะธรรมชาติของวิชากลศาสตร์ควอนตัมที่แปลกและประหลาดนี้ขัดแย้งกับสามัญสำนึกของคนทั่วไป ดังนั้นเราจึงต้องเข้าใจความหมายของคณิตศาสตร์ที่ใช้ เพื่อจะได้เข้าใจวิธีคิด บทความนี้ได้กล่าวถึงประวัติความเป็นมา ประมวลการแปลความหมาย และภาพของเหตุการณ์ในจินตนาการ เพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจสมบัติที่ประหลาดและเหลือเชื่อของทฤษฎีนี้

คำสำคัญ: กลศาสตร์ควอนตัม ทวิภาพของคลื่น-อนุภาค หลักความไม่แน่นอน การซ้อนทับ ความพัวพัน

Quantum Mechanics 0.4

Suthat Yoksan

ABSTRACT

All the concepts and principles necessary to understand quantum mechanics on an initial level are given in a form suitable for the general non-expert. The concepts explained include visualizing the wave function, wave-particle duality, the implications of Schrödinger's cat, probability, the uncertainty principle, superposition, entanglement, and others. Because of the strange non-intuitive nature of quantum mechanics, one must understand the interpretations of its mathematics before one can properly understand these concepts. Thus the paper is organized around histories, interpretations, conceptual pictures that explain the peculiar properties of the theory.

Keywords: Quantum mechanics, Wave-particle duality, Uncertainty principle, Superposition entanglement

บทนำ

ถ้ามีใครถามเราว่า การค้นพบทางวิทยาศาสตร์เรื่องใดยิ่งใหญ่และสำคัญมากที่สุดในช่วงเวลาหนึ่งศตวรรษที่ผ่านมา คำตอบจะมีหลากหลายเรื่อง เช่น ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษและทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปของ Einstein (ปี 1905 และ 1915) กลศาสตร์ควอนตัมของ Planck, Heisenberg และ Schrödinger (ปี 1900, 1925, 1926) การพบโครงสร้างของ DNA โดย Watson กับ Crick (ปี 1953) และการขยายตัวของเอกภพโดย Hubble (ปี 1927) เป็นต้น

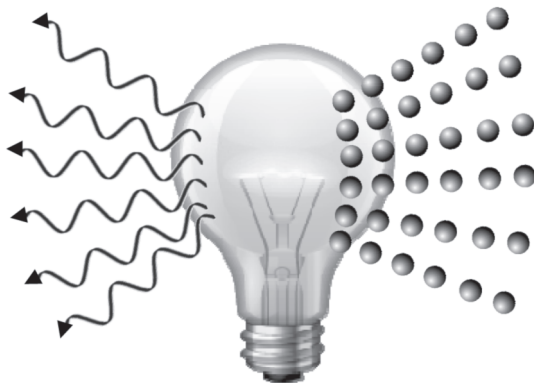
แต่ถ้าจะถามต่อว่าวิทยาการดังกล่าวเรื่องใดสร้างผลกระทบที่กว้างไกลต่อคนทั้งโลก ไม่ว่าจะเป็นการบุกเบิกให้เกิดเทคโนโลยีใหม่ การสร้างความเข้าใจธรรมชาติอย่างลึกซึ้ง ทั้งในระบบที่เล็กระดับอะตอมจนถึงระบบที่ใหญ่ระดับเอกภพ คำตอบก็น่าจะมีเพียงหนึ่งเดียว คือ กลศาสตร์ควอนตัม ที่นักฟิสิกส์ได้เริ่มพัฒนาขึ้น เพื่ออธิบายการแผ่รังสีของวัตถุร้อนและปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดในอะตอม ตั้งแต่การหาค่าอธิบายสาเหตุที่ทำให้อะตอมเปล่งแสง และดูดกลืนแสง อธิบายสาเหตุการเกิดปรากฏการณ์กัมมันตรังสี ซึ่งนำไปสู่การสร้างระเบิดปรมาณูในที่สุด อีกทั้งเป็นวิทยาการที่ทำให้เราเข้าใจสมบัติต่างๆ ของสสาร ไม่ว่าจะเป็นโลหะ อโลหะ เซรามิก สารกึ่งตัวนำ ฉนวน แม่เหล็ก พอลิเมอร์ ของเหลว แก๊ส และตัวนำยวดยิ่ง ฯลฯ นอกจากนี้ กลศาสตร์ควอนตัมยังช่วยให้เรามีเทคโนโลยีการผลิตรังสีเอกซ์ รังสีอินฟราเรด และรู้วิธีทำอุปกรณ์สำหรับตรวจอวัยวะภายในร่างกาย เช่น เทคโนโลยี MRI (magnetic resonance imaging) รู้วิธีสร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง เพื่อประโยชน์ในการวิจัยทางชีววิทยาและการแพทย์ รวมถึงการวางพื้นฐานในการสร้างคอมพิวเตอร์ควอนตัม รู้เทคนิคที่จะพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ ประดิษฐ์ทรานซิสเตอร์ประสิทธิภาพสูง และโทรศัพท์มือถือ สร้างเลเซอร์ที่ใช้ในการผ่าตัด และทำคีมแสง (optical tweezer) ซึ่งเป็นผลงานที่ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ประจำปี 2015 นี้ เพราะเทคโนโลยีต่างๆ เหล่านี้ไม่สามารถจะเกิดขึ้นได้ ถ้าไม่มีการใช้ความรู้พื้นฐานของกลศาสตร์ควอนตัม

นอกเหนือจากการมีประโยชน์ในการสร้างอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อพัฒนาคุณภาพชีวิตแล้ว กลศาสตร์ควอนตัมยังทำให้เราเข้าใจสาเหตุของการเกิดปฏิกิริยาเคมี มีวิธีสร้างและพัฒนาตัวยาใหม่ๆ เพื่อรักษาโรค และพัฒนาอุปกรณ์เพื่อใช้ศึกษาการทำงานของสมอง รวมถึงช่วยให้ตระหนักในความหมายของความจริงและปรัชญาวิทยาศาสตร์ว่าขึ้นกับธรรมชาติของปัจจัยต่างๆ อย่างไรด้วย

ในขณะที่ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษและทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปเกิดจากพลังสมองของบุคคลเพียงคนเดียว คือ Albert Einstein และการพบโครงสร้างของ DNA เกิดจากผลงานของ Rosalind Franklin, James Watson, Francis Crick และ Maurice Wilkins วิชากลศาสตร์ควอนตัมกลับเป็นผลผลิตทางความคิดเชิงทฤษฎี และความเพียรพยายามในการทดลองฟิสิกส์ของคนหลายคน เช่น Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr, Werner Heisenberg, Max Born, และ Erwin Schrödinger เป็นต้น โดย Planck ได้เริ่มต้นด้วยความพยายามจะอธิบายปรากฏการณ์แผ่รังสีของวัตถุร้อน และ Bohr ในเวลาต่อมา เพื่ออธิบายสาเหตุการปล่อยแสงของอะตอม โดยใช้ความรู้ฟิสิกส์ของ Isaac Newton และทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าของ James Maxwell แต่พบว่า ทฤษฎีทั้งสองไม่สามารถอธิบายได้ว่า ความเข้มแสงที่วัตถุร้อนเปล่งออกมาว่า ขึ้นกับอุณหภูมิของวัตถุและความยาวคลื่นต่างๆ ของแสงอย่างไร หรือแม้แต่ปรากฏการณ์ photoelectric ที่มีการพบว่า แสงที่มีความยาวคลื่นสั้น สามารถทำให้อิเล็กตรอนที่มีอยู่ในวัตถุหลุดรอดพุ่งออกมาเป็นกระแสไฟฟ้าได้ รวมถึงการตอบคำถามว่า เหตุใดอะตอมไฮโดรเจนจึงเปล่งแสงได้เฉพาะแสงบางความยาวคลื่นเท่านั้น หาได้ปล่อยแสงทุกความยาวคลื่นไม่

เหล่านี้คือปรากฏการณ์ที่นักฟิสิกส์ก่อนปี ค.ศ. 1900 พบว่า ทฤษฎีฟิสิกส์ที่มีทั้งของ Newton และ Maxwell ไม่สามารถนำมาอธิบายเหตุการณ์ได้เลย เพราะสูตรต่างๆ ของทฤษฎีให้คำตอบที่แตกต่างจากผลที่ได้จากการสังเกตอย่างสิ้นเชิง

ในการค้นหาที่มาของกลศาสตร์ควอนตัม เราอาจเริ่มต้นที่ความพยายามจะศึกษาหาธรรมชาติที่แท้จริงของแสง โดย Christiaan Huygens ซึ่งได้วิเคราะห์ผลการทดลองของ Thomas Young ที่กระทำในปี 1802 โดยได้แสดงให้เห็นว่า ถ้าให้แสงที่มีสีเดียวคือ มีความยาวคลื่นเพียงค่าเดียว ตกกระทบรูขนาดเล็ก 2 รู เมื่อมีการวางฉากหลังรูทั้งสอง Young ได้สังเกตเห็นแสงบนฉากปรากฏเป็นริ้วสว่างและริ้วมืดเรียงสลับกัน นี่คือการปรากฏการณ์แทรกสอด (interference) ที่ Huygens อธิบายว่า เกิดจากการที่แสงมีสมบัติของคลื่น คือ มีความถี่ ความยาวคลื่น เฟส (phase) และแอมพลิจูด (amplitude) และถ้าเฟสของคลื่นทั้งสองตรงกัน การรวมกันของแสงที่มาจากรูทั้งสองจะทำให้เกิดริ้วสว่าง แต่ถ้าเฟสตรงกันข้าม ริ้วที่เห็นจะมืด นี่คือการทดลองที่ใช้แสดงว่า แสงในธรรมชาติเป็นคลื่น (รูปที่ 1) และการชี้แจงนี้ได้เป็นคำอธิบายที่นักฟิสิกส์ทุกคนในเวลานั้นยอมรับ จนกระทั่งปี 1864 James Maxwell จึงได้เสนอทฤษฎีคลื่นของแสง ซึ่งมีความเห็นว่าแสงในธรรมชาติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มียอดประกอบเป็นคลื่นของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากกัน เมื่อการทดลองของ Young และทฤษฎีคลื่นของ Maxwell ให้ผลที่สอดคล้องกัน นักฟิสิกส์จึงได้ยอมรับอย่างฝังใจว่า แสงเป็นคลื่น และมีสมบัติของคลื่น เพราะสามารถแสดงพฤติกรรมการสะท้อน การหักเห การแทรกสอด และการเลี้ยวเบนได้ ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา



รูปที่ 1 แสงมีสมบัติของคลื่น

การค้นพบอิเล็กตรอน โดย Joseph Thomson ในปี 1897 ได้ทำให้นักวิทยาศาสตร์รู้จักอนุภาคอิเล็กตรอนที่มีมวลน้อยกว่าอะตอมไฮโดรเจน ซึ่งเป็นธาตุที่เบาที่สุดประมาณ 2,000 เท่า ว่าอิเล็กตรอนเป็นองค์ประกอบหนึ่งของอะตอม ส่วน Peter Zeeman ได้พบว่า เวลาอิเล็กตรอนถูกเร่ง (คือมีความเร็วเพิ่มขึ้น) ด้วยสนามไฟฟ้า จะปล่อยแสงออกมา

ด้าน Max Planck ซึ่งศึกษาปรากฏการณ์แผ่รังสีของวัตถุร้อนก็ได้แสดงให้เห็นว่า แสงมีความยาวคลื่นต่างๆ ที่วัตถุร้อนเปล่งออกมานั้น ส่วนใหญ่จะเป็นแสงประเภทใดขึ้นกับอุณหภูมิของวัตถุ เช่น วัตถุอุณหภูมิต่ำ วัตถุจะเปล่งแสงสีแดง (ซึ่งมีความยาวคลื่นค่อนข้างมาก) เป็นส่วนใหญ่ แต่ที่อุณหภูมิสูง วัตถุ

จะเปลี่ยนสี คือ เปล่งแสงสีน้ำเงิน (ซึ่งมีความยาวคลื่นน้อย) เป็นส่วนใหญ่ โดยความเข้มของแสงขึ้นกับความยาวคลื่น และอุณหภูมิของวัตถุ ซึ่งถ้าใช้ทฤษฎีของ Maxwell ที่แถลงว่า แสงมีสมบัติของคลื่น และพลังงานแสงขึ้นกับค่าแอมพลิจูดของคลื่นยกกำลังสอง สูตรที่ได้จากการคำนวณจะไม่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการวัดในห้องปฏิบัติการ

ในวันที่ 14 ธันวาคม ปี 1900 หลังจากที่ Planck ได้วิเคราะห์ทฤษฎีคลื่นของแสงแล้วเขาก็ตระหนักว่า พลังงานแสงที่วัตถุร้อนเปล่งออกมา มิได้ขึ้นกับค่าแอมพลิจูดดังที่นักฟิสิกส์ทั้งโลกเข้าใจ แต่ขึ้นกับความถี่ของแสงเท่านั้น นั่นคือ แสงที่มีความถี่หนึ่งก็จะมีพลังงานค่าหนึ่ง แสงในธรรมชาติมีพลังงานที่มีค่าต่างๆ กัน เป็นหน่วยๆ หรือถ้าจะกล่าวเป็นภาษาวิชาการคือ พลังงานของแสงมีค่าเป็นหน่วย ที่ Planck เรียกว่าเป็น quantum

การพบว่าพลังงานของแสง (E) ขึ้นกับความถี่ (ν) ตามสมการ $E = h\nu$ เมื่อ h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant) ทำให้ทฤษฎีควอนตัมถือกำเนิด เพราะเป็นทฤษฎีที่แถลงว่าพลังงานของแสงมีค่าเป็นหน่วย และสามารถอธิบายสมบัติการแผ่รังสีของวัตถุที่อุณหภูมิต่างๆ ได้อย่างดีเลิศ ในขณะที่ทฤษฎีแสงของ Maxwell ไม่สามารถอธิบายการแผ่รังสีของวัตถุร้อนได้เลย

แต่คำอธิบายของ Planck ในกรณีนี้แตกต่างจากความเชื่อเดิมๆ ของนักฟิสิกส์ทุกคนอย่างตรงกันข้าม Planck เองก็ไม่ยินดีที่ได้เสนอคำอธิบายว่า แสงเป็นก้อนพลังงาน จึงปรารถนาว่า ความคิดเรื่องควอนตัมของแสงเป็นองค์ความรู้ที่ถูกต้องโดยบังเอิญ และเขาหวังเป็นอย่างยิ่งว่าในอนาคต คงมีคนที่สามารถอธิบายเรื่องนี้ได้ โดยไม่ต้องใช้สมมติฐานเรื่องก้อนพลังงานของแสง

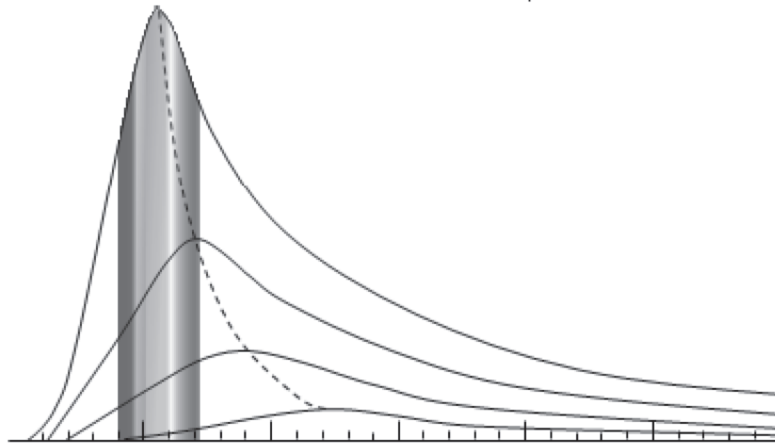
อีกห้าปีต่อมา คือในปี 1905 Albert Einstein ได้นำสมมติฐานเรื่องควอนตัมแสงไปอธิบายที่มาของปรากฏการณ์ photoelectric ซึ่งไม่มีใครสามารถอธิบายได้เช่นกัน ว่าเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น เวลาแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นมาตกกระทบผิวโลหะบางชนิด แล้วทำให้อิเล็กตรอนจำนวนมากกระเด็นหลุดออกจากโลหะในทันที แต่แสงที่มีความยาวคลื่นมาก จะไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้

โดย Einstein ได้อธิบายว่า เวลาแสงพุ่งไปกระทบโลหะที่มีอิเล็กตรอนอยู่ภายใน แสงจะเคลื่อนที่ไปในลักษณะเป็นก้อนพลังงาน เหมือนเม็ดทราย และมีพลังงาน $h\nu$ เหมือนดังที่ Planck ได้เคยเสนอไว้ ครั้นเมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานนี้ มันจะมีพลังงานมากขึ้น ซึ่งถ้ามีค่ามากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวที่มีภายในโลหะ อิเล็กตรอนก็จะหนีออกมาได้ ดังนั้น ในมุมมองของ Einstein แสงจึงมีพฤติกรรมเสมือนเป็นอนุภาคที่มีพลังงาน ในเวลาต่อมา G.N. Lewis เรียกอนุภาคนี้ว่า photon หรืออนุภาคแสง

เพราะความคิดที่ว่า แสงแสดงพฤติกรรมเสมือนเป็นอนุภาคนี้ขัดแย้งอย่างรุนแรงกับความคิดเดิมที่ว่าแสงมีพฤติกรรมเสมือนเป็นคลื่น ดังนั้น จึงไม่มีนักฟิสิกส์คนใดยอมรับอีกเช่นเคย จนกระทั่งอีก 20 ปีต่อมา เมื่อบรรดานักฟิสิกส์รุ่นใหม่ได้ระดมกำลังกันพัฒนาทฤษฎีควอนตัมเพื่อใช้อธิบายสมบัติที่ขัดแย้งกันของแสง

ในช่วงเวลาเดียวกันนี้ได้มีนักฟิสิกส์หลายคนให้ความสนใจศึกษาสมบัติต่างๆ ของสสาร เช่น ความยืดหยุ่น ความหนืด การนำความร้อน การนำไฟฟ้า การขยายตัว ดัชนีหักเห รวมถึงสเปกตรัมของแสง (รูปที่ 2) ที่แก๊ส ทั้งที่เป็นธาตุและสารประกอบปล่อยออกมา เวลาถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้า และได้วัดค่าต่างๆ ของสมบัติต่างๆ ดังกล่าว แต่กลับพบว่า ทฤษฎีฟิสิกส์ในเวลานั้นไม่มีคำอธิบายใดๆ ว่า เหตุใดสารจึงมีสมบัติและค่าของสมบัติตามที่วัดได้ ในส่วนของสเปกตรัมแสงที่แก๊สปล่อยออกมาก็ไม่มีนักฟิสิกส์คนใดสามารถ

อธิบายได้ว่า เหตุใดแก๊สที่เป็นธาตุจึงปล่อยแสงเฉพาะบางความยาวคลื่น แต่ไม่ทุกความยาวคลื่น และที่สำคัญคือไม่มีใครสามารถบอกได้ว่า ข้อมูลที่นักทดลองวัดได้ออกธรรมชาติของสารว่าเป็นอย่างไรบ้าง ยกตัวอย่าง ไม่มีใครสามารถอธิบายได้ว่า เหตุใดกฎของ Dulong-Petit ที่ว่าความร้อนจำเพาะของของแข็งมีค่าคงตัว จึงใช้ไม่ได้เวลาอุณหภูมิของของแข็งลดต่ำ หรือแม้แต่ตารางธาตุที่นักเคมีใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการจัดแยกบรรดาธาตุที่มีในโลกเป็น 7 แถวและเป็น 18 กลุ่มนั้นใช้หลักการอะไรในการแบ่งแยก



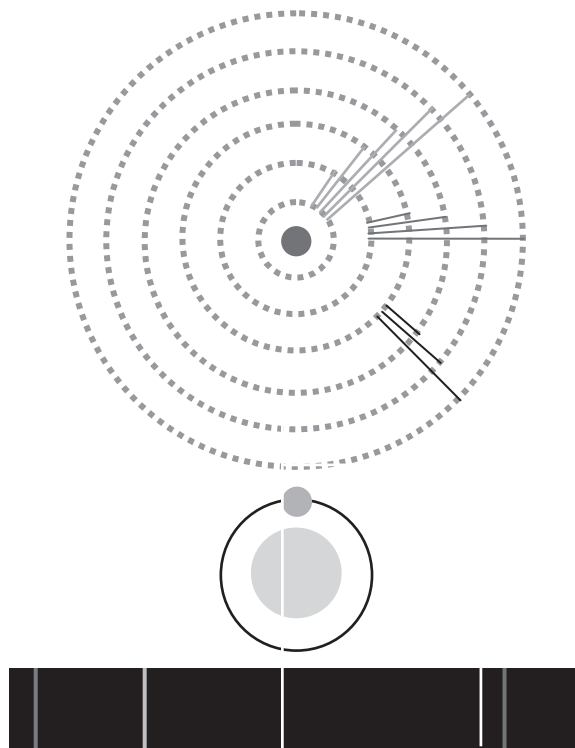
รูปที่ 2 สเปกตรัมของแสง

พัฒนาการครั้งสำคัญเกี่ยวกับการแสวงหาความรู้เรื่องโครงสร้างของอะตอมได้เกิดขึ้นในปี 1911 เมื่อ Ernest Rutherford ทดลองยิงอนุภาคแอลฟาผ่านแผ่นทองคำเปราะ และพบว่า อนุภาคแอลฟาบางส่วนได้กระดอนกลับ การสังเกตเห็นนี้ทำให้ Rutherford พบนิวเคลียส (nucleus) ในอะตอม จึงได้เสนอแบบจำลองของอะตอมว่า อะตอมทุกอะตอมมีนิวเคลียสอยู่ที่จุดศูนย์กลาง และมีอิเล็กตรอนโคจรไปรอบนิวเคลียส ในลักษณะเดียวกับสุริยะจักรวาลที่มีดวงอาทิตย์เป็นศูนย์กลาง และมีดาวเคราะห์ต่างๆ โคจรไปโดยรอบ

แบบจำลองอะตอมของ Rutherford ได้ถูก Niels Bohr นำไปใช้ในปี 1913 เพื่ออธิบายที่มาของบรรดาเส้นสเปกตรัมแสงที่อะตอมไฮโดรเจนปล่อยออกมา ซึ่งนักทดลองได้พบว่ามีความยาวคลื่นเพียงบางค่าเท่านั้น นั่นคือ อะตอมไฮโดรเจนไม่ได้ปล่อยแสงออกมาทุกความยาวคลื่น ในการอธิบายสาเหตุที่เป็นเช่นนี้ Bohr ได้ตั้งสมมติฐานเฉพาะกิจ (ad hoc) ขึ้นหลายข้อเช่น อิเล็กตรอนจะสามารถอยู่ได้ทุกหนแห่งในอะตอม แต่อยู่ได้ในเฉพาะบางที่เท่านั้น คือในวงโคจรที่เป็นวงกลมรอบนิวเคลียส และขณะอยู่ในวงโคจรดังกล่าว อิเล็กตรอนจะไม่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใดๆ ทั้งๆ ที่ตามทฤษฎีของ Zeeman อิเล็กตรอนที่โคจรเป็นวงกลมรอบนิวเคลียส จะมีความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง จึงต้องแผ่รังสี ซึ่งทำให้สูญเสียพลังงานไปตลอดเวลา จนในที่สุด อะตอมก็จะแตกสลาย เพราะอิเล็กตรอนจะโคจรรวนเป็นก้นหอยเข้าหานิวเคลียส แต่ Bohr กลับตั้งสมมติฐานว่า อิเล็กตรอนในวงโคจร ไม่แผ่รังสี จึงไม่สูญเสียพลังงานใดๆ Bohr ได้เรียกสถานะของการเคลื่อนที่ที่ไม่มีการเปลี่ยนพลังงานว่า สถานะนิ่ง (stationary state) และในการกำหนดวงโคจรที่อิเล็กตรอนสามารถอยู่ได้นั้น Bohr ได้ตั้งสมมติฐานเพิ่มเติมว่า ในวงโคจรดังกล่าว โมเมนตัม

เชิงมุมของอิเล็กตรอนจะมีค่าเท่ากับ $\frac{nh}{2\pi}$ เมื่อ n เป็นจำนวนเต็มบวก และ h คือค่าคงตัวของพลังค์ โดยไม่ได้ให้เหตุผลว่าเหตุใดจึงเป็นเช่นนั้น และสมมติฐานสุดท้ายของ Bohr คือ เวลาอิเล็กตรอนกระโดดจากวงโคจรวงนอกเข้าสู่วงโคจรวงใน ความแตกต่างระหว่างพลังงานของอิเล็กตรอนในวงโคจรทั้งสองจะมีค่าเท่ากับพลังงานของแสง คือ เท่ากับ $h\nu$ หรือ hc/λ เมื่อ c คือความเร็วแสง และ λ คือ ความยาวคลื่นของแสงนั้น (รูปที่ 3)

สมมติฐานเฉพาะกิจของ Bohr สามารถอธิบายที่มาของบรรดาเส้นสเปกตรัมแสงที่อะตอมไฮโดรเจนปล่อยออกมาได้ดีมาก จนทำให้นักฟิสิกส์ทุกคนรู้สึกตื่นเต้น เพราะคิดว่า แม้เหตุผลที่ Bohr อ้างดูเลื่อนลอย แต่สมมติฐานจะต้องมีมูลความจริงบ้าง ผลคำนวณจึงสอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดีมาก



รูปที่ 3 สมมติฐานสุดท้ายของ Bohr

อีกหนึ่งปีต่อมาคือในปี 1914 James Franck และ Gustav Hertz ได้สาธิตการทดลองที่แสดงให้เห็นว่าในอะตอมไฮโดรเจนมีอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะนิ่งจริง โดยการยิงอิเล็กตรอนเข้าไปในแก๊สไฮโดรเจน และพบว่าพลังงานของอิเล็กตรอนที่ใช้เป็นกระสุนจะต้องมีค่าน้อยค่าหนึ่ง อะตอมไฮโดรเจนจึงจะเปล่งแสงได้

ถึงปี 1923 Arthur Compton ได้สังเกตเห็นว่า เวลาการฉายรังสีเอกซ์ไปกระทบอิเล็กตรอนอิสระ รังสีเอกซ์ที่กระเจิง (scatter) ออกไป จะมีความยาวคลื่นไม่เท่าเดิม คือ เปลี่ยนแปลงไปตามมุมที่รังสีกระเจิง ในการอธิบายปรากฏการณ์นี้ Compton ต้องตั้งสมมติฐานว่า รังสีเอกซ์ที่ใดๆ ก็คิดว่าเป็นแสงที่มี

ความยาวคลื่นค่อนข้างสั้นนั้น แสดงพฤติกรรมเหมือนเป็นอนุภาค เพราะมีทั้งโมเมนตัม และพลังงานที่เป็นการตอกย้ำอีกคำรบหนึ่งว่า แสง (รังสีเอกซ์) มีสมบัติของอนุภาค

ในปีเดียวกันนั้นเองเมื่อ Louis de Broglie ตระหนักว่า แสงสามารถแสดงสมบัติความเป็นคลื่น (ในปรากฏการณ์แทรกสอด) ได้ และแสดงสมบัติความเป็นอนุภาค (ในปรากฏการณ์ Compton) ก็ได้ de Broglie จึงอาศัยสมบัติสมมาตรระหว่างอนุภาคกับคลื่น เสนอความเห็นที่หลุดโลกว่า อนุภาค เช่น อิเล็กตรอนก็ย่อมสามารถแสดงสมบัติความเป็นคลื่นได้ด้วย นั่นคือ เมื่ออนุภาคแสดงสมบัติคลื่นได้ คลื่นก็ย่อมแสดงสมบัติอนุภาคได้

หลักทวิภาพของสสารและคลื่นได้รับการยืนยันว่าเป็นจริง โดยการทดลองของ George P. Thomson และ Clinton J. Davidson ในปี 1927 ปัจจุบันนักฟิสิกส์ได้พบว่า ไม่เพียงแต่อิเล็กตรอนเท่านั้นที่แสดงสมบัติคลื่นได้ แม้แต่อนุภาคอื่นๆ ที่มีขนาดเล็ก เช่น โปรตอน นิวตรอน อะตอม และโมเลกุล เช่น buckyball ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนจำนวน 60 อะตอมก็สามารถแสดงสมบัติคลื่นได้เช่นกัน

แต่นักฟิสิกส์ก็ยังไม่สามารถทดลองให้เห็นว่า สสารที่มีขนาดใหญ่ เช่น รถยนต์สามารถแสดงสมบัติความเป็นคลื่นในปรากฏการณ์เลี้ยวเบนได้ ทั้งนี้เพราะรถยนต์มวล 3 ตันที่มีความเร็ว 100 กิโลเมตร/ชั่วโมง จะมีความยาวคลื่นประมาณ 10^{-38} เมตร ซึ่งหมายความว่า เราต้องใช้ในการสาธิตปรากฏการณ์เลี้ยวเบนของรถยนต์ต้องมีรัศมีประมาณ 10^{-38} เมตรด้วย คือ เล็กยิ่งกว่าอนุภาคอิเล็กตรอนประมาณล้าน ล้านเท่า ดังนั้น การสาธิตเรื่องการเลี้ยวเบนของรถยนต์จึงไม่สามารถแสดงให้เห็นได้

เมื่อมีการทดลองที่ยืนยันว่า อิเล็กตรอนแสดงพฤติกรรมเป็นอนุภาคก็ได้และคลื่นก็ได้ ส่วนแสงก็แสดงพฤติกรรมเป็นคลื่นก็ได้และอนุภาคก็ได้ ดังนั้นในปี 1925 W. Heisenberg และ E. Schrodinger จึงได้พัฒนาวิชากลศาสตร์ควอนตัมขึ้นมา เพื่อใช้อธิบายสมบัติของระบบที่มีขนาดเล็กมากระดบอะตอม โดยอาศัยทฤษฎีควอนตัมของ Planck และสมบัติทวิภาพของสสารเป็นหลักการพื้นฐาน

ช่วงเวลาตั้งแต่ปี 1925 ถึง 1928 จึงเป็นเวลาในโลกฟิสิกส์ปั่นป่วนด้วยการปฏิวัติหลักการและปฏิรูปความคิดเก่าๆ ทั้งหมด โดยในปี 1925 Wolfgang Pauli ได้แถลงหลักการห้ามซ้อนกัน (exclusion principle) ของสถานะอิเล็กตรอนในอะตอม ซึ่งเป็นพื้นฐานที่นักฟิสิกส์ใช้ในการจัดแยกธาตุในตารางธาตุ (periodic table) ในเวลาเดียวกัน Werner Heisenberg, Max Born และ Pascual Jordan ก็ได้บุกเบิกแนวคิดใหม่ว่า การกล่าวถึงปริมาณใดๆ ในทางฟิสิกส์ที่ไม่มีใครสามารถวัดค่าได้ เป็นเรื่องที่ไม่ควรนำมาพิจารณา อาทิเช่น การกล่าวถึงความเร็วของอิเล็กตรอนในวงโคจรรอบอะตอม หรือรัศมีของวงโคจร แต่สิ่งที่ควรนำมาพิจารณาในการสร้างทฤษฎีคือ สิ่งที่สามารถวัดค่าได้เท่านั้น เช่น ในกรณีอะตอมไฮโดรเจน การเปลี่ยนแปลงพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างวงโคจรที่ m กับวงโคจรที่ n จะปล่อยแสงออกมาให้นักทดลองวัดความยาวคลื่นได้ ซึ่งอาจจะเขียนในรูปคณิตศาสตร์เป็น x_{mn} ที่อยู่ในรูปของ matrix จากนั้นทั้งสามก็ได้สร้างวิชากลศาสตร์ควอนตัมขึ้นมาในรูปของเมตริกซ์ ทำให้วิชานี้เป็นที่รู้จักในนาม กลศาสตร์เมตริกซ์ (matrix mechanics) และสามารถเขียนหลักความไม่แน่นอนเป็นสมการได้ว่า $\Delta x \Delta p \geq h/4\pi$ เมื่อ Δx กับ Δp เป็นความไม่แน่นอนของตำแหน่งและโมเมนตัมตามลำดับ และ $p_x - x p = h/2\pi i$ เมื่อ i คือรากที่สองของ -1 ในที่นี้ x, p เป็นเมตริกซ์ของตำแหน่งกับโมเมนตัม และสมการนี้แสดงว่า commutation ของ p และ x มีค่าเท่ากับ $h/2\pi i$

อีกหนึ่งปีต่อมา Erwin Schrödinger ได้พัฒนากลศาสตร์ควอนตัมบ้าง โดยใช้สมบัติความเป็นคลื่นของอนุภาคเป็นหลัก ทำให้ได้สมการคลื่น (wave equation) ของปริมาณที่เรียกว่า ฟังก์ชันคลื่น (wave function) ซึ่งมีข้อมูลที่บอกทุกประการของอนุภาค เช่น โมเมนตัม พลังงาน และตำแหน่ง ฯลฯ โดยที่ค่าแอมพลิจูดของฟังก์ชันคลื่นเวลา ยกกำลังสองจะบอกโอกาสที่อิเล็กตรอนอยู่ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในอะตอม เพราะที่ตำแหน่งต่างๆ มีโอกาสการพบอิเล็กตรอนไม่เท่ากัน ดังนั้นการแสดงโอกาสการพบอิเล็กตรอนในทุกหนแห่งจึงทำให้ดูเหมือนมีก้อน “เมฆ” อิเล็กตรอนล่องรอบนิวเคลียส สมการที่ Schrödinger คิดขึ้นมานี้ในเวลาต่อมา เป็นที่รู้จักในนามสมการของ Schrödinger และกลศาสตร์ในรูปแบบนี้มีชื่อเรียกว่า กลศาสตร์คลื่น (wave mechanics)

แม้รูปแบบ matrix mechanics ของ Heisenberg และรูปแบบ wave mechanics ของ Schrödinger จะแตกต่างกัน แต่ Schrödinger ก็ได้แสดงให้เห็นในเวลาต่อมาว่า รูปแบบทั้งสองสมมูลกัน คือ สอดคล้องกัน ดังนั้นโลกของระบบควอนตัมจึงมีกฎแจ่มสองดอก ที่ “ไม่เหมือนกัน” แต่สามารถไขความลับของอะตอมได้ดีเท่ากัน

การที่กลศาสตร์ควอนตัมมีรูปแบบและวิธีคิดที่แตกต่างไปจากฟิสิกส์ของ Newton และ Maxwell อย่างสิ้นเชิงนี้ ทำให้วงการฟิสิกส์มีการถกเถียงและอภิปรายกันมากกว่า กลศาสตร์ควอนตัมมีขอบเขตของการใช้ได้กว้างขวางเพียงใด โดยมีนักฟิสิกส์ที่ยืนหยัดเคียงข้างกลศาสตร์ควอนตัมซึ่งได้แก่ Bohr และ Heisenberg แต่ Einstein คัดค้านและต่อต้าน เพราะไม่เข้าใจความหมายของคณิตศาสตร์ที่ใช้ และไม่ยอมรับเรื่องการจะรู้คำตอบของฟิสิกส์อย่างแน่นอนว่าเป็นเรื่องที่เป็นไปได้หรือไม่ได้อีกต่อไป

ในกลศาสตร์ควอนตัม ฟังก์ชันคลื่นจะมีข้อมูลด้านสมบัติกายภาพทุกประการของอนุภาค ดังนั้นการรู้ฟังก์ชันคลื่น จะทำให้รู้ตำแหน่ง โมเมนตัม ทั้งเชิงเส้นและเชิงมุม รวมถึงพลังงานของอนุภาคก็สามารถคำนวณค่าได้หมด และค่าต่างๆ เหล่านี้จะมีการกระจาย คือไม่เท่ากันเสมอไป เมื่อฟังก์ชันคลื่นมีรูปแบบเป็นคลื่น คือ มีแอมพลิจูด เฟส และความยาวคลื่น ดังนั้น เราจึงไม่สามารถบอกได้แน่ชัดว่า อนุภาคอยู่ที่ตำแหน่งใดในคลื่น นั้นหมายความว่า การรู้ตำแหน่งแน่ชัดของอนุภาคจึงมีความไม่แน่นอนเกิดขึ้น ส่วนโมเมนตัมนั้นขึ้นกับความชันของฟังก์ชันคลื่น ซึ่งถ้าความชันของฟังก์ชันคลื่นมีค่ามาก โมเมนตัมก็ยิ่งมีค่ามาก เพราะฟังก์ชันคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ ในคลื่นมีความชันไม่สม่ำเสมอ คือ มากบ้าง และน้อยบ้าง ดังนั้นโมเมนตัมจึงมีค่ามากบ้าง และน้อยบ้าง ทำให้การวัดโมเมนตัมมีความไม่แน่นอน ในทำนองเดียวกับการมีความไม่แน่นอนในการวัดตำแหน่งของอนุภาค

นี่เป็นความแตกต่างที่สำคัญระหว่างฟิสิกส์ยุคเก่ากับฟิสิกส์ควอนตัม เพราะในฟิสิกส์ยุคเก่าของ Newton เราสามารถรู้ตำแหน่ง และโมเมนตัมของอนุภาคใดๆ ได้อย่างแม่นยำ แต่ในกลศาสตร์ควอนตัม ความไม่แน่นอนของทั้งตำแหน่งและโมเมนตัมเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และ Heisenberg ก็ได้นำแนวคิดนี้มาแถลงเป็น หลักความไม่แน่นอน (uncertainty principle) ว่า ความไม่แน่นอนของตำแหน่ง x ความไม่แน่นอนของโมเมนตัม p เมื่อคูณกันจะต้องมีค่ามากกว่า $h/4\pi$ เสมอ หรือ $\Delta x \times \Delta p \geq h/4\pi$ จากสมการนี้ เราจะเห็นได้ว่า ถ้าเรากำหนดให้อนุภาคอยู่ที่หนึ่งใดโดยไม่ให้ไปที่อื่นใด นั่นคือ $\Delta x = 0$ ทำให้ฟังก์ชันคลื่นจะมีลักษณะเป็นยอดแหลม แต่เส้นโค้งที่เป็นยอดแหลม ความชันจะมีค่ามาก เมื่อโมเมนตัมมีค่ามาก ความไม่แน่นอนของโมเมนตัมก็ต้องมีค่ามากด้วย

ดังนั้น เราจึงเห็นได้ว่าในการศึกษาระบบขนาดอะตอม แม้อะตอมจะเหมือนกันทุกประการ แต่เวลาวัดค่าต่างๆ เราจะได้ค่าเดียวกัน คือ จะมีการกระจายของค่าที่วัดได้เสมอ ความไม่แน่นอนในการวัดเป็นสมบัติพื้นฐานสำคัญที่ทำให้กลศาสตร์ควอนตัมแตกต่างไปจากฟิสิกส์ยุคเก่า

ในขณะที่คนทุกคนกำลังงุนงงและสับสนว่า อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคหรือเป็นคลื่น Bohr ได้เสนอหลักการเติมเต็ม (complementarity principle) ซึ่งมีใจความว่า ในการศึกษากระบวนการควอนตัมใดๆ เราจำเป็นต้องใช้คำอธิบายที่ครอบคลุมสมบัติทั้งสองด้าน คือ สมบัติอนุภาคและสมบัติคลื่น ความเข้าใจในระบบจึงจะสมบูรณ์ ดังนั้น การกล่าวถึงสมบัติคลื่นหรือสมบัติอนุภาคเพียงด้านเดียว ไม่เพียงพอ และระบบจะแสดงสมบัติด้านใดก็ขึ้นกับว่า นักทดลองต้องการจะทดสอบสมบัติด้านใด เช่น ถ้าจัดวางการทดลองให้ระบบแสดงสมบัติคลื่น ผลก็จะได้ว่าระบบเป็นคลื่น แต่ถ้าจัดวางการทดลองให้ระบบแสดงสมบัติอนุภาค ก็จะได้ว่าระบบเป็นอนุภาค โดยที่ระบบนั้นจะไม่แสดงสมบัติทั้งคลื่นและอนุภาคได้ในเวลาเดียวกัน

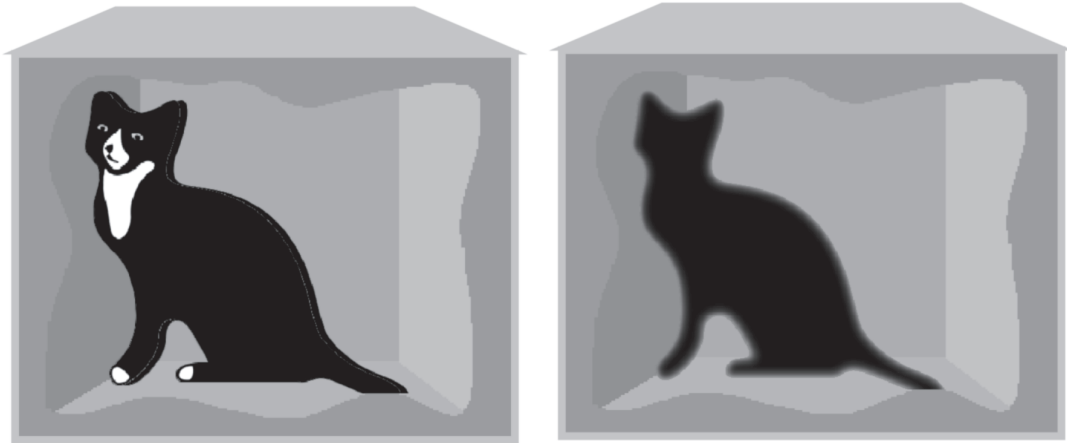
หลักการเติมเต็มของ Bohr ได้รับการยืนยันว่าสมบูรณ์ และสอดคล้องกับหลักความไม่แน่นอนของ Heisenberg ที่แสดงว่า เราไม่สามารถวัดหรือรู้ตำแหน่งและโมเมนตัมของอนุภาคใดๆ ได้อย่างแม่นยำในเวลาเดียวกัน ข้อจำกัดนี้มาจากการกำหนดของธรรมชาติ มิได้มาจากการไร้ความสามารถของนักวิทยาศาสตร์หรือของอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ และ Bohr ได้อธิบายเสริมว่า ก่อนจะลงมือวัดค่าของโมเมนตัม หรือตำแหน่งของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนมิได้มีโมเมนตัม และตำแหน่งที่มีค่าแน่นอน แต่สามารถมีโมเมนตัมได้หลายค่า และสามารถอยู่ได้ทุกหนแห่งในเวลาเดียวกัน ดังนั้นตำแหน่งและโมเมนตัมของอิเล็กตรอนจึงมีความไม่แน่นอนเป็นธรรมชาติอยู่ในตัวของมัน

หลักการเติมเต็มที่ Bohr นำเสนอในปี 1927 และหลักความไม่แน่นอนของ Heisenberg ทำให้ Einstein และ Bohr มีความเห็นไม่ตรงกันเกี่ยวกับธรรมชาติของระบบควอนตัม ปราชญ์ทั้งสองจึงโต้แย้งและคัดค้านเหตุผลของกันและกัน อย่างไม่มีใครยอมใคร โดย Einstein ได้พยายามนำเสนอการทดลองในจินตนาการที่แสดงให้เห็นว่า หลักความไม่แน่นอนจะไม่เป็นจริงเสมอไป แต่ Bohr ก็นำเหตุผลมาหักล้างข้อโต้แย้งของ Einstein ได้ทุกครั้งไป จน Einstein ยอมรับว่า ในระบบควอนตัม หลักความไม่แน่นอนของ Heisenberg เป็นเรื่องที่ไม่มีความสามารถหลีกเลี่ยงได้ กระนั้น Einstein ก็ยังรู้สึกคาใจและยังไม่ยอมรับทฤษฎีควอนตัมว่าเป็นทฤษฎีที่สมบูรณ์แบบ (คือ Einstein คาดหวังว่าในอนาคตจะมีคนที่สามารถดัดแปลงทฤษฎีให้ดีขึ้นได้อีก) และถ้าเวลานั้นมาถึง Einstein ก็มีความเห็นว่า ในที่สุดกลศาสตร์ควอนตัมจะสามารถบอกความจริงของเหตุการณ์ต่างๆ ได้แน่นอนอย่างแม่นยำตรง โดยปราศจากความไม่แน่นอนใดๆ

แม้นักฟิสิกส์ส่วนใหญ่ยังงุนงงกับข้อโต้แย้งและไม่เข้าใจทฤษฎีควอนตัมของอะตอม แต่ Heisenberg กับ Schrödinger ก็ได้เดินทางพัฒนาทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัมต่อ จนสามารถอธิบายที่มาของเส้นสเปกตรัมแสงจากอะตอมฮีเลียมที่มีความซับซ้อนยิ่งกว่าอะตอมไฮโดรเจนได้ดีพอสมควร เราจึงนับว่ากลศาสตร์ควอนตัมได้ถือกำเนิดตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา

แม้เทคนิคคำนวณที่นักฟิสิกส์จะใช้จะให้คำตอบที่ตรงกับผลการทดลองอย่างน่าอัศจรรย์ใจ แต่การแปลความหมายของเทคนิคที่ใช้ในการคำนวณก็ยังคลุมเครือ ในปี 1935 Schrödinger ซึ่งเป็นผู้หนึ่งที่ทำให้กำเนิดวิชากลศาสตร์ควอนตัมจึงเสนอความเห็นอธิบายธรรมชาติของระบบควอนตัมว่า เพราะระบบควอนตัมมีสถานะที่สามารถเป็นไปได้มากมายดังนั้นสถานะที่แท้จริงของระบบจึงได้จากการรวมสถานะที่เป็นไปได้ทุกกรณี และเรียกเทคนิคนี้ว่า หลักการซ้อนทับ (superposition principle) และเพื่อจะได้เข้าใจหลักการที่นำเสนอ

Schrödinger ได้สมมติมีกล่องที่มีฝาปิดสนิท (รูปที่ 4) ซึ่งภายในมีแมวตัวเป็นๆ หลอดยาพิษที่บรรจุสารไฮยาไนด์ ค้อน สารกัมมันตรังสี และเครื่องตรวจจับกัมมันตรังสี ซึ่งจะบังคับค้อนให้ทุบหลอดยาพิษ ซึ่งจะทำให้หลอดแตก แล้วปล่อยแก๊สพิษออกมาฆ่าแมวทันทีที่สารกัมมันตรังสีสลายตัว



รูปที่ 4 เทคนิคที่ใช้แมวอธิบายหลักการซ้อนทับ

หลังจากที่เวลาผ่านไปพอสมควร ทุกคนจะรู้ว่าในกล่องมีโอกาส 50-50 ที่สารกัมมันตรังสีจะสลายตัว และไม่สลายตัว นั่นคือโอกาสที่แมวจะตาย หรือจะมีชีวิตก็มีค่า 50-50 ด้วย ซึ่งหมายความว่าแมวในกล่องจะมีสภาพตายครึ่งหนึ่งและเป็นครึ่งหนึ่ง (คือเป็นซอมบี้) ดังนั้น ขณะยังไม่มีเปิดฝากล่อง จึงไม่มีใครรู้ว่า แมวจะตายหรือจะเป็น จนกระทั่งมีการเปิดฝากล่องออกดูก็จะเห็นว่า แมวในกล่อง เป็นแมวเป็นหรือตายอย่างหนึ่งอย่างใดอย่างชัดเจน โดยจะไม่มีใครที่เห็นแมวทั้งตายและเป็นในเวลาเดียวกัน

เนื้อหาของบททดลองในจินตนาการที่ทำให้ทุกคนรู้สึกอึดอัดคือ ความจริง (ว่าแมวเป็นหรือตาย) ถูกกำหนดโดยการสังเกต ดังนั้นถ้าไม่มีการสังเกต ความจริงเกี่ยวกับแมวจะเป็นลักษณะคลุมเครือ คือแมวสามารถอยู่ในสภาพเป็นและสภาพตายได้พร้อมกัน ซึ่งเป็นไปไม่ได้ในโลกที่ทุกคนมีประสบการณ์ นั่นคือ ในกลศาสตร์ควอนตัม เราจะไม่รู้อะไรอย่างแน่นอน จนกระทั่งได้ลงมือวัด หรือสังเกต

นอกจากสถานะเป็นและตายของแมวที่เป็นไปได้ในเวลาเดียวกันแล้ว กลศาสตร์ควอนตัมยังแสดงให้เห็นอีกว่า อิเล็กตรอนสามารถอยู่ได้ทุกสถานที่ในบริเวณรอบอะตอม สามารถมี spin ที่ชี้ขึ้น และชี้ลงได้ในเวลาเดียวกัน (spin เป็นสมบัติควอนตัมของอิเล็กตรอนที่หมุนรอบตัวเองและแสดงพฤติกรรมเสมือนเป็นแท่งแม่เหล็ก คือมีขั้ว) และอนุภาคสองอนุภาคที่มีอันตรกิริยากัน ถ้าถูกจับแยกให้อยู่คนละข้างของเอกภพ กลศาสตร์ควอนตัมก็ยืนยันว่า การรู้สมบัติกายภาพของอนุภาคหนึ่งจะทำให้รู้สมบัติกายภาพของอีกอนุภาคได้ในทันที เพราะอนุภาคทั้งสองมีความพัวพัน (entanglement) กัน

หลักการซ้อนทับ และสมบัติความพัวพันนี้ทำให้คนที่ไม่ได้เรียนกลศาสตร์ควอนตัมงุนงงและไม่เชื่อ เพราะแมวที่เป็น 50% และตาย 50% หรืออิเล็กตรอนที่สามารถอยู่ได้ทุกที่ในเวลาเดียวกัน มีสภาพเป็นอย่างไร และในกรณีความพัวพันของ photon สองอนุภาคที่มีอันตรกิริยากัน โดยเราจะไม่มีวัน

ทราบชัดว่า photon ใดอยู่ในสถานะใด แล้วการวัดสมบัติของ photon หนึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลของอีก photon หนึ่งในพื้นที่ เหมือนกับการรู้สมบัติของอนุภาคแรกจะบังคับอนุภาคตัวที่สองให้แสดงข้อมูลของสถานะที่สอดคล้องกับอนุภาคแรกได้ในทันที ซึ่งเป็นเรื่องเหลือเชื่อและเหนือจริงสำหรับคนทั่วไป

นี่คือตัวอย่างปรากฏการณ์ในระบบควอนตัมที่ทำให้ Einstein รู้สึกกังวลมาก เพราะไม่เชื่อว่า อนุภาคจะมีความพัวพันกันได้ จึงได้หาประเด็นมาโต้แย้งเพื่อแสดงให้เห็นว่ากลศาสตร์ควอนตัมยังไม่สมบูรณ์

ในปี 1935 Einstein กับ Boris Podolsky และ Nathan Rosen แห่งมหาวิทยาลัย Princeton จึงได้เสนอปฏิทรรศน์ (paradox) ที่แสดงว่า ทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัมยังไม่สมบูรณ์ โดยปฏิทรรศน์นั้นมีใจความว่า ถ้าอนุภาคสองอนุภาคมีอันตรกิริยากัน และในเวลาต่อมาถูกจับแยกกัน กลศาสตร์ควอนตัมยืนยันว่า อนุภาคทั้งสองยังเป็นองค์ประกอบของระบบเดียวกัน คือไม่สามารถแยกเป็นอิสระจากกันได้ เป็นสองระบบ ดังนั้นถ้ามีการวัดโมเมนตัมของอนุภาคหนึ่ง ข้อมูลที่ได้จะทำให้รู้โมเมนตัมของอนุภาคอีกตัวหนึ่งในทันที ในทำนองเดียวกัน ถ้าวัด spin ของอนุภาคหนึ่ง ข้อมูลที่ได้จะทำให้รู้ spin ของอนุภาคที่สองในทันที (เสมือนกับการมีรองเท้าสองข้าง ถ้านำรองเท้าข้างหนึ่งใส่กล่องไปรษณีย์แล้วส่งไปปลายทางที่เชียงใหม่ และนำรองเท้าอีกข้างหนึ่งใส่กล่องส่งไปที่อุบลราชธานีถ้าคนที่เชียงใหม่ได้รับรองเท้าข้างขวา เขาก็จะรู้ในทันทีว่าคนที่อุบลราชธานีได้รับรองเท้าข้างซ้าย) Einstein, Podolsky และ Rosen มีได้ปฏิเสธว่า การรู้สมบัติของอนุภาคตัวหนึ่งจะทำให้รู้สมบัติของอนุภาคอีกตัวหนึ่ง แต่ประเด็นที่คนทั้งสามสงสัย คือ การรู้สมบัติทั้งตำแหน่งและโมเมนตัมของอนุภาคตัวหนึ่งแสดงว่า ตำแหน่ง และโมเมนตัมของอนุภาคอีกตัวหนึ่งมีค่าแน่นอน ซึ่งขัดกับหลักความไม่แน่นอนของ Heisenberg แต่ Bohr อ้างว่า ไม่ขัด เพราะข้อมูลตำแหน่งจะยังไม่ปรากฏจนกระทั่งมีการลงมือวัด ดังนั้น การไม่รู้ข้อมูลตำแหน่ง โดยยังไม่มี การวัด จึงไม่ขัดกับหลักความไม่แน่นอน

โดย Bohr ได้ชี้แจงว่า ในกลศาสตร์ควอนตัม ความจริงของสรรพสิ่งในธรรมชาติเกิดขึ้นหลังการวัด ก่อนการวัด สมบัติต่างๆ ไม่มีค่าแน่นอน เช่น ในกล่องทั้งสองใบที่ส่งไปเชียงใหม่และอุบลราชธานีนั้น ยังไม่มีใครสามารถบอกได้ว่าเป็นรองเท้าข้างซ้ายหรือข้างขวา คือรองเท้าที่อยู่ในกล่องทั้งสองจะเป็นทั้งข้างซ้ายและข้างขวาพร้อมกัน จนกระทั่งคนเชียงใหม่เปิดกล่องออกดู ก็จะปรากฏในทันทีว่ารองเท้าเป็นข้างซ้ายหรือข้างขวา และในเวลาเดียวกัน คนที่อุบลราชธานีก็จะพบว่า รองเท้าที่เห็นเป็นข้างขวาหรือข้างซ้าย การรู้ข้อมูลในทันที โดยที่องค์ประกอบอยู่ห่างกันมากเป็นสมบัติลึกลับอีกประการหนึ่งของระบบควอนตัม (แต่ Einstein ไม่เห็นด้วยกับคำอธิบายนี้ เพราะ Einstein คิดว่า ความจริงมีอยู่ตลอดเวลา โดยไม่จำเป็นต้องมีการวัด เช่น เราจะแหงนดูท้องฟ้าหรือไม่ดู ดวงจันทร์ก็มีอยู่ตลอดเวลา แต่ Bohr อธิบายว่า ไม่ใช่ ถ้าไม่ดู ดวงจันทร์ก็ไม่มี ความจริงต่างๆ เกิดขึ้นหลังการสังเกต

ความพัวพันนี้เป็นเรื่องจริงที่เกิดขึ้นจริงในระบบควอนตัม แต่ยังไม่เกิดในระบบสิ่งมีชีวิต เช่น ในคน เพราะถ้าเกิดความโกลาหลอลหม่านจะเกิดขึ้นทันที เพราะบางคนอาจจะคิดว่า คนก็ประกอบด้วยอนุภาค (โปรตอน อิเล็กตรอน ฯลฯ) ซึ่งต่างก็มีสมบัติความพัวพัน ดังนั้นคนก็ควรแสดงสมบัติพัวพันด้วย ยกตัวอย่างกรณี นาย ก. กับนาง ข. ได้พบกัน ณ สถานที่หนึ่ง และได้สนทนา (มีอันตรกิริยา) กัน โดยทั้งสองคนมิได้เอ่ยถึงคู่ครอง (คือ นาง ค. และนาย ง.) แม้แต่เพียงคำเดียว เมื่อกลับถึงบ้าน นาย ก. กลับจำนาง ค. ไม่ได้ แต่กลับรู้สึกจู้จี้กับนาย ง. เป็นอย่างดี ทั้งๆ ที่ไม่เคยเห็นหน้าค่าตากัน ซึ่งนักฟิสิกส์จะอธิบายเหตุการณ์นี้ว่า อันตรกิริยาระหว่าง ก. กับ ข. ได้ทำลายความพัวพันระหว่างนาย ก. กับนาง ค. และสร้างความพัวพันให้เกิด

ขึ้นระหว่างนาย ก. กับนาย ง.

สมบัติเรื่องการซ้อนทับเป็นอีกเรื่องหนึ่งที่ทำให้คนทั่วไปงงง ในกลศาสตร์ควอนตัมนั้น ถ้าอะตอมสามารถอยู่ได้ในสองสถานะ คือ สถานะ $|A\rangle$ กับ $|B\rangle$ แล้วสถานะที่แท้จริงของอะตอมก็จะเป็น $a|A\rangle + b|B\rangle$ คือมีสองสถานะปนกัน โดยที่ a^2 กับ b^2 แสดงโอกาสที่อนุภาคจะอยู่ในสถานะ $|A\rangle$ และ $|B\rangle$ ตามลำดับ นี่คือหลักการซ้อนทับ จนกระทั่งถึงเวลาที่มีการวัด อะตอมก็จะปรากฏอยู่ในสถานะที่เป็น $|A\rangle$ หรือ $|B\rangle$ โดยที่สถานะหนึ่งจะหายไป ซึ่งอธิบายได้ว่าเพราะอันตรกิริยาระหว่างอะตอมกับอุปกรณ์วัด เป็นสาเหตุที่ทำให้สถานะ $|A\rangle$ หรือ $|B\rangle$ สลายไป นี่คือ ปรากฏการณ์ quantum decoherence ที่ถ้าเป็นกรณีแมว การเปิดกล่องจะทำให้เห็นแมวตายหรือแมวเป็น อย่างหนึ่งอย่างใด โดยสถานะแมวทั้งเป็นและตายจะไม่มีวันปรากฏให้เห็นได้พร้อมกัน

มุมมองของกลศาสตร์ควอนตัมในประเด็นนี้ยังเป็นเรื่องที่คนหลายคนนักปรัชญายังค้างคาใจ และต้องการเข้าใจความหมายของความจริงในกลศาสตร์ควอนตัมว่า จากการมีโอกาสความเป็นไปได้มากมาย แต่เวลาวัดสมบัติของระบบควอนตัม นักทดลองกลับวัดได้ค่าเดียว แล้วค่าอื่นๆ ที่เป็นไปได้ ได้อันตรธานไปที่ใด หรือถูกยุบรวมกันด้วยกลไกใด

ในการอธิบายข้อสงสัยประเด็นนี้ Huge Everett แห่งมหาวิทยาลัย Princeton ในสหรัฐอเมริกา ได้เคยเสนอความเห็นไว้ ถ้าระบบควอนตัมมีความเป็นไปได้หลายรูปแบบ (มากถึงอนันต์) ความจริงก็สามารถมีหลายรูปแบบ (มากถึงอนันต์) เช่นกัน ดังนั้นเวลานักฟิสิกส์วัดได้ค่าหนึ่ง ค่าอื่นๆ จะไปปรากฏอยู่ในพหุภพ (multiverses) อื่น และนักฟิสิกส์เองก็แยกตัวเป็นนักฟิสิกส์จำนวนอนันต์ที่ต่างก็ไม่ตระหนักในการมีอยู่ของกันและกัน

มุมมองของ Everett ที่เป็น “Many Worlds” หรือ “Parallel Universes” นี้ ได้พยายามเสริมความไม่สมบูรณ์ของการอธิบายโดย Bohr แต่ยังไม่สำเร็จ เพราะนักฟิสิกส์ส่วนมากยังมีความเชื่อว่าเป็นการอธิบายแนว metaphysics ที่เหนือจริง

เอกสารอ้างอิง

1. Kakalios, J. (2010). *The amazing story of quantum mechanics: A math-free exploration of the science that made our world*. Duckworth overlook, UK.
2. Feynman, R. (1990). *QED: The strange theory of light and matter*. Penguin Press Science, Gardners Books.
3. Clegg, B. (2009). *The god effect: quantum entanglement, science's strangest phenomenon*. St. Martin's Griffin.

